



다양한 배기 규제 운전 모드 상에서 가솔린 하이브리드 차량의 전기 가열식 촉매 성능 실험 연구

김성우¹⁾ · 이민호¹⁾ · 김성수²⁾ · 김정환^{*3)} · 김홍석⁴⁾ · 우상희⁴⁾ · 박준한⁵⁾ · 김세준⁵⁾
한국석유관리원 미래기술연구소¹⁾ · 중앙대학교 에너지시스템공학과²⁾ · 중앙대학교 에너지시스템공학부³⁾ · 한국기계연구원 모빌리티동력연구실⁴⁾ · 한국유미코아촉매 PM팀⁵⁾

Experimental Investigation on Performance of Electrically Heated Catalyst for a Gasoline Hybrid Vehicle Under Various Regulatory Driving Cycles

Sungwoo Kim¹⁾ · Minho Lee¹⁾ · Seongsu Kim²⁾ · Junghwan Kim^{*3)} · Hongsuk Kim⁴⁾ · Sang-Hee Woo⁴⁾ · Junhan Park⁵⁾ · Sejun Kim⁵⁾

¹⁾Research Institute of Future Technology, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority, 33 Yangcheong 3-gil, Ochang-eup, Cheongwon-gu, Cheongju-si, Chungbuk 28115, Korea

²⁾Department of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University, Seoul 06974, Korea

³⁾School of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University, Seoul 06974, Korea

⁴⁾Department of Eco-Friendly Mobility Power, Korea Institute of Machinery and Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 32, Korea

⁵⁾Product Management, Umicore Catalysis Korea Co., Ltd., 331 Songdogukje-daero, Yeonsu-gu, Incheon 21990, Korea
(Received 1 August 2025 / Revised 31 August 2025 / Accepted 1 September 2025)

Abstract : This study investigated the performance of an electrically heated catalyst(EHC) system composed of an electrically heated three-way catalyst(EH TWC) and a catalyzed gasoline particulate filter(EH-cGPF) in a mid-size hybrid vehicle under real driving conditions. The EHC was designed to enable rapid catalyst activation during cold start by applying a 1.5 kW electric heater for 40 seconds before and 20 seconds after engine start. Experiments were conducted using a chassis dynamometer under the Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle(WLTC) and the Urban Dynamometer Driving Schedule(UDDS) to evaluate emissions characteristics. In the WLTC, the EHC system achieved 200 °C in approximately 12 seconds—38 seconds faster than the non-heated case—resulting in a 37.5 % reduction in CO and a 17.4 % reduction in THC emissions during the first 200 seconds. Under the UDDS cycle, the EHC-equipped vehicle demonstrated CO emissions of 0.074 g/km, significantly below the U.S. Tier 3 limit of 0.621 g/km, while NMOG+NOx slightly exceeded the standard. These results confirm that the direct-heating EHC system significantly improves cold-start emission control and demonstrates compliance with both Euro 7 and U.S. Tier 3 regulations when applied to hybrid vehicles.

Key words : Electrically heated catalyst(전기가열식 촉매), Three-way catalyst(삼원촉매), WLTP(세계 조화 모드), UDDS(도심 주행 사이클), Heat transfer(열전달), Gasoline hybrid vehicle(가솔린 하이브리드 차량)

Nomenclature

TWC : three-way catalyst
THC : total hydrocarbon
NOx : nitric oxides

EHC : electrically heated catalyst
FOSMC : forward sliding mode control
STC : super twisting control
cGPF : catalyzed gasoline particulate filter

*Corresponding author, E-mail: jkim77@cau.ac.kr

*This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

EH-cGPF : electrically heated cGPF
 WLTP : worldwide harmonized light vehicles test protocol
 EH-TWC : electrically heated three-way catalyst
 UDDS : urban dynamometer driving schedule
 PGM : platinum group metals
 CVS : constant volume sampler
 NMHC : non-methane hydrocarbon
 NMOG : non-methane organic gas
 ECU : engine control unit

1. 서론

지속적인 환경 규제 강화와 온실가스 감축 요구에 따라 자동차 배출가스 저감 기술의 중요성이 커지고 있다. 특히 가솔린 차량은 시동 직후 냉간 조건에서 다량의 오염물질이 배출되며, 이는 전체 배출량의 상당 부분을 차지한다.¹⁾ 이러한 현상은 삼원 촉매(Three-Way Catalyst, TWC)가 일정 온도 이상에서만 활성화되어 CO, THC(Total Hydrocarbon), NOx(Nitric Oxides) 등의 규제 물질을 효과적으로 전환할 수 있기 때문이다. 이에 따라 시동 직후 촉매를 신속히 활성화할 수 있는 기술의 개발이 중요하며, 그 중 하나로 전기 가열식 촉매(Electrically Heated Catalyst, EHC)가 주목받고 있다. EHC는 시동 전후에 전기히터를 이용해 촉매를 빠르게 가열함으로써 배출가스 후처리 시스템의 조기 활성화를 가능하게 한다.

하이브리드 차량은 연료 효율성과 저공해 성능의 장점을 동시에 갖추고 있으나, 엔진이 수시로 정지되고 재시동되는 특성으로 인해 촉매 온도가 저하되기 쉽고, 이에 따라 반복적인 냉간 조건이 발생하여 오염물질 배출이 증가할 수 있다. 이러한 운전 조건에서는 엔진 배기열만으로는 촉매의 온도를 안정적으로 유지하기 어렵고, 반복적인 시동 시 EHC는 촉매 온도 유지 및 재가열을 통해 후처리 시스템의 활성화를 지속적으로 지원할 수 있다. 따라서 하이브리드 차량에 적합한 EHC 시스템의 설계와 운전 전략 수립, 그리고 실주행 조건에서의 효과 정량화가 필요하다.

EHC에 대한 체계적인 연구는 1990년대 중반부터 진행되었으며, Pfalzgraf 등²⁾은 촉매, 전원 공급장치, 제어기 및 진단 시스템을 통합한 EHC 시스템을 설계하고, FTP-75 주행 모드에서 HC 배출을 초기 120초간 약 75% 저감함을 입증하였다. 이후 다양한 차량 플랫폼과 주행 조건에 대응하는 설계와 제어 전략이 개발되었으며, 특히 하이브리드 차량 특성에 대응한 정밀 제어 방식과 시스템 통합 연구가 활발히 진행되고 있다.³⁾ 예를 들어 Ramanathan 등⁴⁾

은 플러그인 하이브리드 차량을 대상으로 예열 및 후열 전략의 효과를 수치적으로 분석하였고, Mianzarasvand 등⁵⁾은 이륜차에 적용한 전단 가열 조건에서 CO 배출이 최대 500 mg까지 감소함을 확인하였다. 최근 Canè 등⁶⁾은 주행 조건 예측을 바탕으로 사전 예열 전략을 적용하여 CO 배출을 초기 60초간 최대 92%까지 저감하였으며, Yan 등⁷⁾은 48V 마일드 하이브리드 차량에서 EHC가 THC, CO, NOx, PN 배출을 각각 최대 44%, 11%, 32%, 72%까지 저감함을 실험으로 입증하였다.

EHC의 성능 향상을 위해서는 정밀한 온도 제어가 필수적이며, 이에 대한 제어 전략 연구도 진행되고 있다. Landarouche와 Bakhti⁸⁾은 하드웨어 인더 루프(HIL)를 고려한 간소화된 EHC 모델을 제시하고, FOSMC(Forward Sliding Mode Control)와 STC(Super Twisting Control)를 적용해 촉매 활성화 시점 단축과 제어 안정성 향상을 입증하였다. 특히 STC는 발열 제어의 채터링을 억제하는 데 효과적이었다.

기존 연구는 대부분 촉매 진단에 히터를 배치해 배기 가스 유동을 통해 전체 촉매를 가열하는 대류 기반 방식에 집중되어 있다. 이 방식은 구조가 단순하고 기존 시스템에 쉽게 통합 가능하나, 히터와 촉매 간 접촉이 없어 열 전달 효율이 낮고 활성화까지 시간이 소요된다는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해, 최근에는 촉매 내부 또는 표면에 히터를 직접 접촉시키는 전도 기반 EHC 시스템에 대한 연구가 확대되고 있다. Kim 등⁹⁾은 다공성 SiC 기반 촉매 필터(cGPF) 내부에 전기히터를 직접 삽입한 EH-cGPF 시스템을 제안하였으며, 2D 다물리 모델과 실험을 통해 전도 가열 방식이 촉매 온도 상승 속도와 균일한 열분포 측면에서 우수함을 보였다.

직접 가열 방식의 EHC를 실차에 적용한 Woo 등¹⁰⁾의 연구에서는 삼원촉매를 코팅한 필터 내에 전기히터를 삽입하여 WLTP 모드에서 초기 200초간 CO 및 THC 배출을 각각 37.5%, 17.4% 저감시켰으며, 이는 실차 기반의 중요한 실증적 성과로 평가된다.

본 연구에서는 Woo 등¹⁰⁾의 구조 기반 EHC에 백금 함량을 보강한 삼원촉매(EH-TWC)를 적용하여, EH-cGPF와 함께 하이브리드 중형 차량에 장착하였다. 기존 cGPF 기반 EHC는 후처리 일체화의 장점이 있으나 귀금속 함량에 제약이 있으며, 이에 비해 본 연구의 삼원촉매는 더 높은 전환 효율이 기대된다. 또한 WLTP뿐만 아니라 미국의 UDDS 운전 모드에서도 성능을 비교 평가하여, 해당 시스템이 유럽과 북미의 대표적인 배출 규제를 모두 충족할 수 있는지를 검증하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 실험 차량

본 연구에서는 중형 하이브리드 세단 차량(그랜저 IG, 현대자동차, 대한민국)을 대상으로 EHC의 성능 특성을 분석하였다. Table 1은 자세한 차량 제원을 보여 준다.

Table 1 Vehicle specifications

Parameters	Units	Nominal values
Overall length	mm	4,930
Overall width	mm	1,865
Overall height	mm	1,470
Wheelbase	mm	2,845
Curb weight	kg	1,675
Tire size	mm	225/55 R17

2.1.1 하이브리드 동력시스템

대상 차량은 병렬형(P2) 하이브리드 시스템을 가지고 있다. 자연 흡기 방식의 가솔린 엔진과 38 kW 전기모터로 최대 149 kW의 시스템 출력을 확보한다.

Table 2 Powertrain specifications

Parameters	Units	Nominal values
Engine displacement	cm ³	2,359
Engine power	kW	117
Electric motor power	kW	38
Maximum torque	kg·m	21.0
Transmission	-	6 speed automatic
Batter capacity	kWh	1.76

2.1.2 EHC

EHC는 Fig. 1과 같이 EH-TWC와 EH-cGPF로 구성되었다. EH-TWC는 대상 차량에 장착된 삼원 촉매와 동일한 담체를 유동방향과 수직하게 절단하고 그 사이 면에 전기히터를 장착하였다. EH-cGPF는 SiC 필터를 Fig. 2와 같이 적층하고 적층면 사이에 전기히터를 설치하였다. EH-TWC와 EH-cGPF는 각각 Flow-through 방식과 Wall-flow 방식을 따르며, 이는 기존의 삼원촉매 및 입자상물질 필터

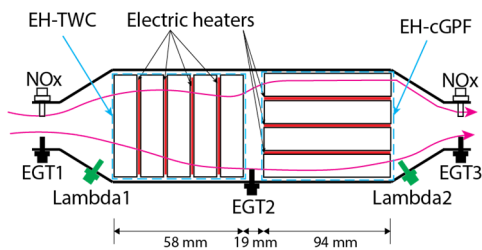


Fig. 1 Schematic of the EHC structure



Fig. 2 Structure of EH-cGPF



Fig. 3 EHC assembly before installation

터 구조와 동일하다. 통상적으로 삼원 촉매는 백금 함량이 높으나, SiC 필터는 높은 열전도성을 가져 히터에 의한 직접 가열의 효과가 크다. Fig. 3은 배기 포트를 포함한, 장착 준비 완료된 EHC를 보여 준다.

본 연구에서는 EHC의 전기히터에 운행 시작 전 40초간, 시작 직후 20초간 1.5 kW의 전력이 인가되었다.

2.2 차량 실험 및 장치

본 연구에서는 실험 차량을 차량 동력계(Chassis dynamometer)에 설치하고 두 종류의 배기 분석계를 활용하여 규제 대상 가스를 측정하였다. WLTP와 UDSS 운전 모드에서 CO 배출량과 촉매 전후단 온도를 통해 EHC의 성능 특성을 분석하였다. 두 실험 모두 상온(약 25 °C)에서 수행되었다.

2.2.1 배기 분석계

EHC의 전환 성능 특성을 분석하기 위해 촉매 전후단에서 배기 가스 내 규제 대상 물질을 가스 분석계로 측정하였다. 촉매 전후단에서 측정된 규제 대상 물질은 체적 분율 (%) 단위로 비교 분석하였다.

또한 촉매 후단에서 CVS(Constant Volume Sampler) 방식으로 규제 대상 물질을 측정하였다. 희석 터널(Dilution tunnel)로 희석된 배기가스는 가스 샘플백에 포집하여 가

스 분석계(MEXA series, HORIBA, Japan)로 측정하였다. 배출한 CO와 THC의 질량은 포집한 샘플 가스 부피를 기반으로 도출하였다.¹⁰⁾

2.2.2 규제 운전 모드

본 연구에서는 WLTP와 UDSS 운전 모드에서 EHC의 CO 저감 성능 특성을 살펴보았다. WLTP는 속도를 기준으로 Low, Medium, High, 그리고 Extra-high 네 개 부분으로 구성되어 있으며 각각 도심, 교외, 고속도로 전단, 고속도로 주행 조건을 모사한다. UDSS는 도시 주행 조건을 모사하여 정지 및 재출발 빈도가 많다. 두 운전 모드의 주요 제원은 Table 3에서 비교할 수 있다.

Table 3 Specifications of WLTP and UDSS drive cycles

Parameters	Units	WLTP	UDSS
Time	s	1,800	1,369
Distance	km	23.27	12.07
Average speed	km/h	46.5	31.5
Maximum speed	km/h	131.3	91.25

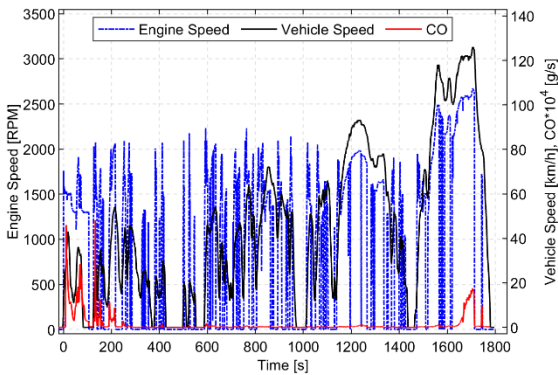


Fig. 4 Engine speed, vehicle speed, CO emission during WLTP with the EHC heater deactivated

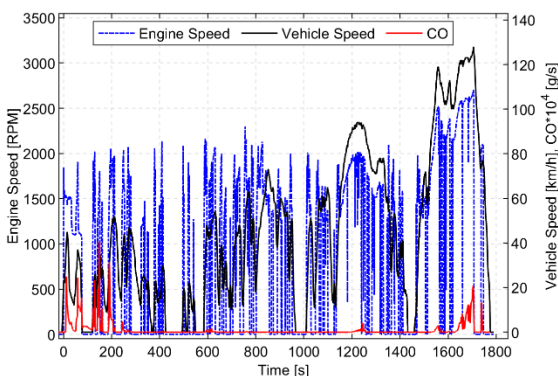


Fig. 5 Engine speed, vehicle speed, CO emission during WLTP with the EHC heater activated

3. 결과 및 고찰

3.1 WLTP

Fig. 4와 Fig. 5는 WLTP 모드에서 각각 EHC의 전기 히터가 가동되지 않은 조건(EHC 전력 미인가 케이스)과 가동된 조건(EHC 전력 인가 케이스)에서 CO 배출량을 보여 준다. 두 조건 모두 초기 시동 후 200초 이내에서 많은 CO가 발생함을 알 수 있다.

초기 200초간 비교를 위해 Fig. 6과 Fig. 7을 살펴본다. 시동 후 약 80초까지 엔진 작동은 유사하나 EHC 전력 인가 케이스에서 더 적은 CO가 배출되었다. 또한 EHC 전력 인가 시 약 80초에서 105초까지 엔진이 멈춘 것을 알 수 있다. 이는 차량 감속 과정에서 연비 향상을 위해 엔진을 정지시킬 수 있는 하이브리드 시스템의 장점이다. 이를 통해 EHC의 전기 히터에 의해 촉매가 더 빨리 Warm-up되어 활성화된 것으로 유추한다. 결과적으로 200초간 CO 배출량은 전력 미인가 케이스에서 0.144 g이고 전력 인가 시 0.090 g으로 37.5% 저감되었다.

THC의 경우 Fig. 8과 Fig. 9에서 보듯이 EHC 전력 인가 케이스에서 일시적으로 더 높은 THC 피크가 관찰되었지

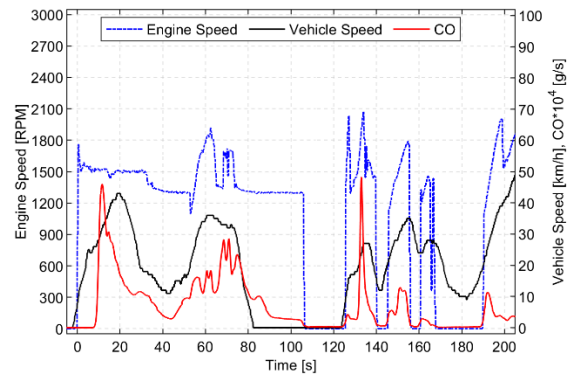


Fig. 6 Engine speed, vehicle speed, CO emission during the first 200 s in WLTP with EHC deactivated

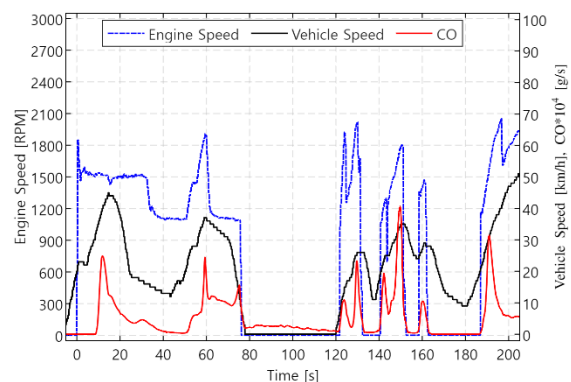


Fig. 7 Engine speed, vehicle speed, CO emission during the first 200 s in WLTP with EHC activated

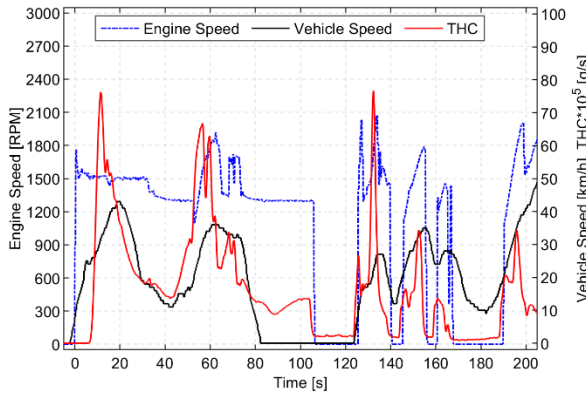


Fig. 8 Engine speed, vehicle speed, THC emission during the first 200 s in WLTP with EHC deactivated

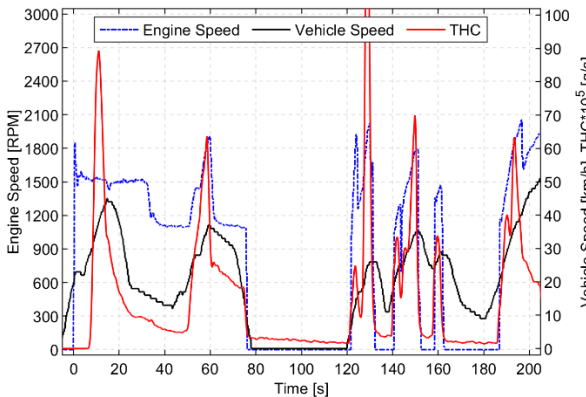


Fig. 9 Engine speed, vehicle speed, THC emission during the first 200 s in WLTP with EHC activated

만, 80~100초 구간의 엔진 정지와 함께 전체 배출량은 낮은 수준을 유지하였다. 참고로 본 연구에서는 엔진 제어 로직에 어떠한 변경도 가하지 않았다. EHC 전력 인가 케이스에서의 빠른 엔진 정지는 ECU(Engine Control Unit)에 내장된 제어 로직에 의한 것이다. 결과적으로 EHC 전력 인가 시 초기 200초간 THC는 0.0321 g에서 0.0265 g으로 17.4% 저감되었다.

초기 시동 시 EHC의 성능을 판단하기 위해 Fig. 10과 Fig. 11을 통해 전후단의 CO 배출량을 비교해 보았다. 앞서 Fig. 5와 Fig. 6에서 확인한 바와 같이 초기 60초까지는 두 케이스에서 엔진이 유사하게 작동하였다.

Fig. 10은 초기 60초간 두 케이스에서 CO 배출량이 동등한 수준이었음을 보여 준다. 그리고 이러한 동등 조건에서 EHC 전력 인가 시(EHC ON) CO를 더 많이 저감했음을 Fig. 11에서 확인할 수 있다.

Fig. 12는 EHC로 진입하는 배기 가스 온도가 두 케이스에서 동등한 수준이었음을 보여 준다. Fig. 13은 EHC 출구에서 두 케이스의 가스 온도 차이를 보여 준다. EHC

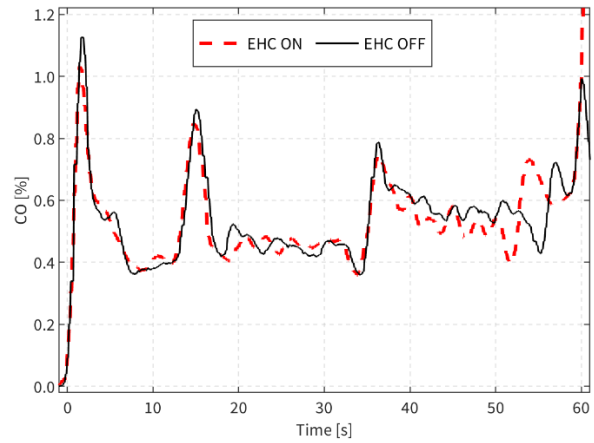


Fig. 10 CO (%) emissions at the upstream of EHC with heater-on and heater-off for the first 60 s in WLTP

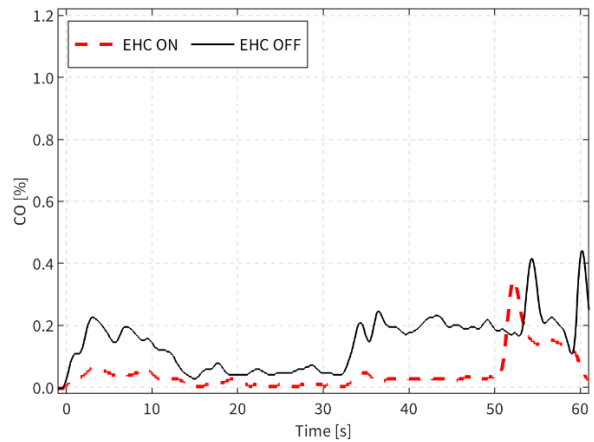


Fig. 11 CO (%) emissions at the downstream of EHC with heater-on and heater-off for the first 60 s in WLTP

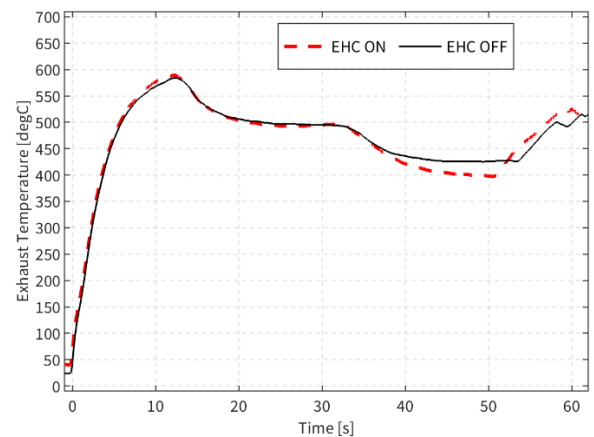


Fig. 12 Exhaust gas temperature at the upstream of EHC with heater-on and heater-off for the first 60 s in WLTP

전력 인가 시 시동 후 약 12초만에 195 °C에 도달한다. 이는 미인가 조건에서의 50초 대비 38초 빠른 시간이다.

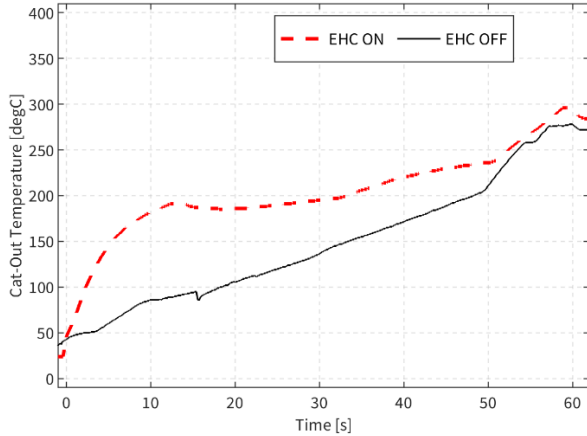


Fig. 13 Exhaust gas temperature at the downstream of EHC with heater-on and heater-off for the first 60 s in WLTP

Table 4는 WLTP 모드에서 CO와 HC 배출량을 보여 준다. EHC는 모드 시작 직후 20초 동안만 전력이 인가되었기에 운행 초기에 그 영향이 크다. THC는 초기 200초 결과와 다르게 모드 전체에서는 다소 증가하였다. 그러나 CO와 THC 배출량 모두 유로 7 규제 기준을 충분히 만족시키는 수준이다.

Table 4 CO and HC emissions of the two cases in WLTP

Species	Units	EHC heater on	EHC heater off	EURO 7 standard
CO	g/km	0.103	0.120	0.5
THC	g/km	0.028	0.025	0.1

3.2 UDSS

Fig. 14는 UDSS 모드에서의 엔진속도, 차량 속도, CO, THC, Nox 배출량을 보여 준다. EHC는 WLTP와 마찬가지로 시동 직전 40초간 예열되었고, 시동 후에도 20초간 1.5 kW의 전력이 인가되었다.

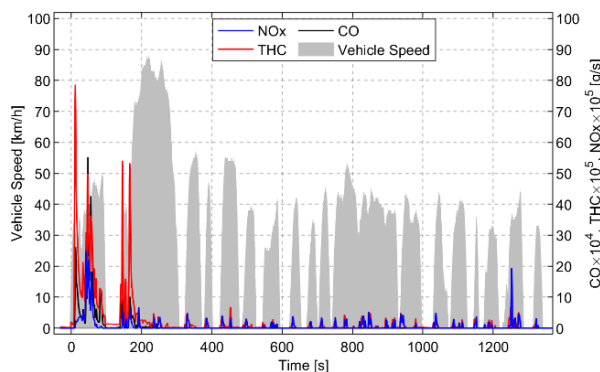


Fig. 14 CO, THC, Nox emissions during UDSS with the EHC heater activated

Fig. 15에서는 WLTP모드에서와 마찬가지로 차량 속도가 20 km/h에 도달 후 엔진이 작동한 것을 보여 준다. 이후 엔진속도는 약 1500 RPM을 유지하며 차량 속도는 30 km/h에서 50 km/h로 점차 증가하였다. WLTP에 비해 속도 변화 폭이 작으며, 이에 따라 전체적인 CO 배출량도 상대적으로 낮았다.

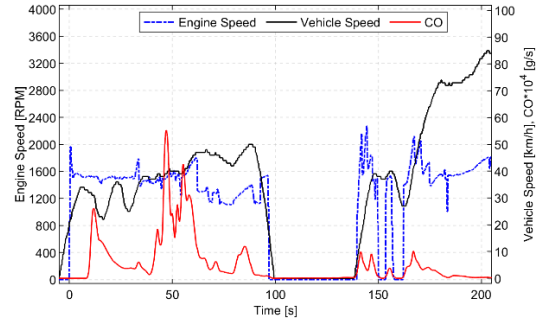


Fig. 15 Engine speed, vehicle speed, CO emission during the first 200 s in WLTP with EHC activated

Fig. 16에서는 촉매 전후단에서 배기가스 온도를 보여 준다. 촉매 후단 온도는 EHC 예열에 의해 엔진 시동 전에 70 °C에 도달했다. 이후 배기가스와 20초간의 전기 히터 가열로 12초만에 약 195 °C에 도달했다. 이는 Fig. 13에서 확인한 WLTP 모드에서의 결과와 동등한 수준이다.

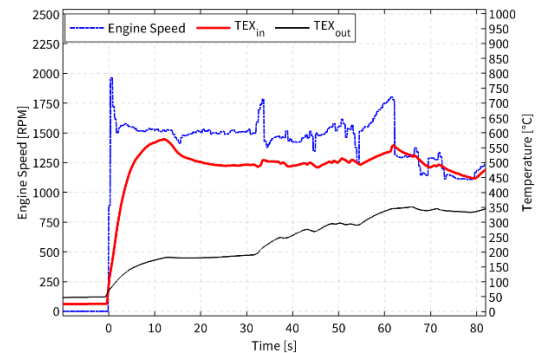


Fig. 16 Exhaust gas temperatures at the upstream (TEX_in) and downstream (TEX_out) of EHC with heater activated in UDSS

Table 5는 UDSS 모드에서 측정된 배출가스와 미국 환경보호청(EPA)의 Tier 3 규제 기준을 비교하여 제시한 것이다. NMHC(Non-methane Hydrocarbon)는 THC에서 CH₄을 제외한 성분으로, THC 및 CH₄의 측정값을 바탕으로 산정하였다. NMOG(Non-methane Organic Gas)는 NMHC의 104 %로 환산하여 추정하였으며,¹¹⁾ 이를 Nox와 합산한 NMOG+Nox 값은 Tier 3 규제 기준을 초과하는 것으로 나타났다.

Table 5 CO and HC emissions in UDDS with EHC heater activated

Species	Units	EHC heater on	Tier 3 standard
CO	g/km	0.074	0.621
NMOG+Nox	g/km	0.032	0.0186

4. 결 론

본 연구에서는 전기히터가 내장된 삼원 촉매(EH-TWC)와 촉매 코팅 입자상물질 필터(EH-cGPF)로 구성된 EHC를 개발하고, 하이브리드 차량에 적용하여 WLTP 및 UDDS 모드에서 성능을 평가하였다.

- 1) 전기히터 인가 시 촉매의 활성화가 현저히 가속되었다. WLTP 조건에서 배기온도는 시동 후 약 12초 만에 195 °C에 도달하였으며, 이는 전력 미인가 조건보다 약 38초 빠른 수치이다. 이에 따라 초기 구간에서 CO와 THC 배출량이 각각 37.5 %와 17.4 % 감소하여 효과적인 저감 성능을 확인할 수 있었다.
- 2) UDDS 조건에서도 전기히터의 적용은 긍정적인 효과를 보였다. CO 배출량은 0.074 g/km로 나타나 미국 Tier 3 규제 기준인 0.621 g/km을 충분히 만족하였다. 이는 전기히터가 다양한 주행 조건에서 초기 배출 제어에 기여할 수 있음을 보여준다. 추후 예열과 시동 후 가열의 상대적 영향력을 평가하여 가열 전략 최적화하고자 한다.
- 3) NMOG+NOx 배출은 Tier 3 규제 기준을 초과하는 수준으로 확인되었다. 이는 촉매 활성화 촉진만으로는 모든 오염물질 제어에 한계가 있음을 의미한다. 따라서 향후에는 배기 후처리 시스템 최적화 및 보조 저감 기술과의 융합을 통해 NMOG+NOx 저감 전략을 보완할 필요가 있으며, 추가적으로 배기가스 내 NH₃ 농도를 측정하여 암모니아 후처리장치의 도입 가능성을 평가하고자 한다.

후 기

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구입니다(과제번호 20019072).

References

- 1) D. V. Velmurugan, T. McKelvey and J.-O. Olsson, "A Simulation Framework for Cold-Start Evaluation of a Gasoline Engine Equipped with an Electrically Heated Three-Way Catalyst," IFAC PapersOnLine, Vol.54,

- No.10, pp.526-533, 2021.
- 2) B. Pfalzgraf, E. Otto, A. Wirth, P. F. Küper, W. Held and A. Donnerstag, "The System Development of Electrically Heated Catalyst (EHC) for the LEV and EU-III Legislation," SAE 951072, 1995.
- 3) K. Li, B. Xiao, Y. Wang, J. Jia and X. Wu, "Applications of Electric Heating Technology in Vehicle Exhaust Pollution Control," Processes, Vol.12, No.2, Paper No.298, 2024.
- 4) K. Ramanathan, S. H. Oh and E. J. Bissett, "Electrically Heated Catalysts for Hybrid Applications: Mathematical Modeling and Analysis," Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol.50, No.14, pp.8444-8467, 2011.
- 5) F. Mianzarasvand, A. Shirmeshan and M. Afrand, "Effect of Electrically Heated Catalytic Converter on Emission Characteristics of a Motorcycle Engine in Cold-Start Conditions: CFD Simulation and Kinetic Study," Applied Thermal Engineering, Vol.127, pp.453-464, 2017.
- 6) S. Canè, L. Brunelli, S. Gallian, A. Perazzo, A. Brusa and N. Cavina, "Performance Assessment of a Predictive Pre-Heating Strategy for a Hybrid Electric Vehicle Equipped with an Electrically Heated Catalyst," Applied Thermal Engineering, Vol.219, Paper No.119341, 2023.
- 7) P. Yan, X. Wang, Z. Wang, T. Gao, Y. Huo and X. Gu, "Impact of Electric Heating Catalyst on the Emissions for a 48V Hybrid Light-Duty Vehicle," E3S Web of Conferences, Vol.352, Paper No.03014, 2022.
- 8) N. Landarouche and M. Bakhti, "Robust Temperature Control for an Electrically Heated Catalyst Using First-Order Sliding Mode and Supertwisting Controllers," IFAC PapersOnLine, Vol.55, No.12, pp.365-370, 2022.
- 9) S. Kim, H. Kim, S. H. Woo, M. Lee, K.-H. Noh, S. Kim and J. Kim, "Analysis of the Structure and Heating Strategy of Electrically Heated Catalytic Filters Based on a Two-Dimensional Multiphysics Model," Transactions of KSAE, Vol.32, No.12, pp.943-949, 2024.
- 10) S. H. Woo, H. Jang, K.-H. Noh, M.-H. Lee, S. Kim and H. Kim, "Reduction of WLTC Emissions of Hybrid Gasoline Engine by Using an Electric Heater Embedded Three-Way Catalyst Coated Particulate Filter," Transactions of KSAE, Vol.32, No.2, pp.159-166, 2024.
- 11) California Air Resources Board, California 2015 through 2025 Model Criteria Pollutant Exhaust Emission Standards and Test Procedures and 2017 and Subsequent Model Greenhouse Gas Exhaust Emission Standards and Test Procedures for Passenger Cars, Light-Duty Trucks, and Medium-Duty Vehicles, California Environmental Protection Agency, 2022.